

Utilização de Algoritmos de Processamento e Análise de Imagem na Avaliação do Dano em Placas Compósitas

L. M. P. Durão¹, A. G. Magalhães¹, A. T. Marques², João Manuel R. S. Tavares²

lmd@isep.ipp.pt, agm@isep.ipp.pt, marques@fe.up.pt, tavares@fe.up.pt

¹Centro de Investigação e Desenvolvimento em Engenharia Mecânica
Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto

²Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto

Resumo. A utilização de materiais compósitos tem vindo a aumentar nas últimas décadas em virtude das suas notáveis propriedades mecânicas. Referem-se como vantagens no seu uso o baixo peso, elevada resistência e rigidez. A furação de placas compósitas é um desafio que se coloca às indústrias que trabalham com este tipo de materiais, sendo frequente o recurso a ferramentas convencionais com adaptações. Contudo, a presença de defeitos devidos a operações de maquinagem pode afectar severamente as propriedades mecânicas das peças maquinadas, nomeadamente em zonas de ligação. Neste trabalho, apresenta-se uma técnica baseada no uso de algoritmos de Processamento e de Análise de Imagem que permite a avaliação de defeitos causados pela maquinagem de placas compósitas e que pode ser utilizada no estudo e definição de estratégias de maquinagem tendentes à minimização do dano envolvido. As conclusões obtidas mostram que tal redução do dano permite um aumento da resistência mecânica das peças e a aplicação de algoritmos de Processamento e Análise de Imagem revela-se adequada.

Palavras-chave: Furação; Delaminação; Radiografia; Processamento e Análise de Imagem.

Abstract. The use of fiber reinforced plastics has increased in the last decades due to their unique properties. Advantages of their use are related with low weight, high strength and stiffness. Drilling of composite plates is a challenge to the industries related with these materials. Normally, machining can be carried out in conventional machinery with some adaptations. However, the presence of typical defects like delamination can severely affect mechanical properties of produced parts. In this paper, a technique for delamination measurement based on algorithms of Image Processing and Analysis is presented. This technique can be helpful in the evaluation of damage for the comparison of drilling parameters or tools. Conclusions show that damage minimization is an important mean to improve mechanical properties of joint areas of plates and the appropriateness of the algorithms of Image Processing and Analysis used.

Keywords: Drilling, Delamination, Radiography, Image Processing and Analysis.

1 Introdução

O uso de laminados compósitos em estruturas dinâmicas tem vindo a permitir uma considerável redução de peso com a consequente melhoria das suas propriedades mecânicas. Embora numa fase inicial a utilização deste tipo de materiais se encontrava dirigido e limitado às indústrias aeroespacial e aeronáutica, a contínua redução de preços, fruto do considerável aumento da capacidade de produção instalada, tem permitido o alargamento da sua aplicação a outras indústrias tais como a automóvel, ferroviária, naval, de artigos desportivos e muitas outras.

As dificuldades que ainda se verificam no seu uso estão relacionadas com os elevados custos de produção de peças, essencialmente devidos às operações de maquinagem necessárias. Embora as peças sejam obtidas com forma muito próxima da final, o recurso a operações de maquinagem continua a ser necessário para o cumprimento de tolerâncias dimensionais e geométricas, bem como para a execução de furos que permitem a posterior montagem a outras peças do conjunto em causa. A furação é assim uma operação bastante habitual neste tipo de peças.

A operação de furação nestes materiais tem algumas particularidades, tais como a existência de dois efeitos com consequências diversas das que habitualmente se identificam na furação de materiais metálicos: A ponta da broca, quasi-estacionária, exerce um efeito de indentação que se torna responsável pela delaminação, como se verá mais adiante. Nas lâminas exteriores da broca o corte é ortogonal, de acordo com as teorias de maquinagem conhecidas, e mais eficaz (Langella et al, 2005). Assim, é essencial a obtenção de um corte limpo para não afectar as propriedades mecânicas da peça maquinada.

Dado que os materiais compósitos não são homogéneos nem isotrópicos, a operação de furação causa problemas específicos que podem originar diversos tipos de dano na região à volta do furo efectuado. Na indústria aeronáutica 60% das peças rejeitadas são devidas a problemas devidos à furação (Stone & Krishnamurthy, 1996). Os defeitos mais frequentes são, para além da já referida delaminação, o arrancamento de fibras, causado pela perda de afiamento da aresta cortante da ferramenta usada, as fissuras interlaminares e os danos térmicos provocados na peça. A presença de fibras abrasivas conduz a um rápido desgaste da ferramenta, levando a frequentes interrupções para a sua troca. Qualquer um destes danos leva a uma perda considerável das propriedades mecânicas da peça na zona de ligação, quer estáticas quer dinâmicas (nomadamente, da resistência à fadiga) (Persson et al, 1997). No entanto, a delaminação, que se caracteriza pelo descolamento entre camadas adjacentes do laminado causada por uma acção externa, é apontada como o dano mais severo, pelo que deve ser evitado (Abrate, 1997).

A ocorrência de delaminação depende essencialmente de acções exteriores; isto é, do efeito de indentação causado pela ponta da broca e de propriedades do laminado tais como a natureza das fibras e da resina. Distinguem-se dois tipos de delaminação: à entrada e à saída do laminado.

A delaminação à entrada é causada pela acção de abrasão devida ao início do contacto entre a broca e a peça. Em consequência do avanço da ferramenta de furação o material tende a ser puxado para cima ao longo das espiras da broca em vez de ser cortado. Este efeito leva a que as camadas superiores do material se separem do resto da placa – figura 1. A redução do avanço permite solucionar este problema.

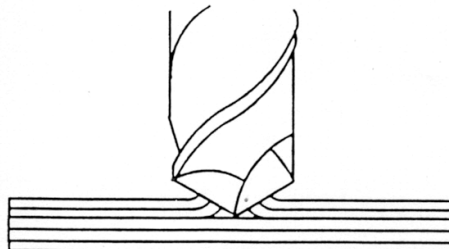


Figura 1 – Mecanismo de delaminação à entrada (imagem de (Abrate, 1997)).

Por seu lado, a delaminação à saída é consequência da força compressiva que a broca exerce sobre a peça. As camadas de laminado que se encontram abaixo da broca tendem a ser separadas das camadas superiores, fracturando as ligações interlaminares na região à volta do furo. Se, num dado instante, a força se torna superior à resistência interlaminar da placa ocorre a delaminação, antes que o laminado seja totalmente penetrado pela broca – figura 2. A escolha de uma geometria de broca ou a selecção de parâmetros de corte adequados permite reduzir a probabilidade de ocorrência deste defeito (Hocheng & Dharan, 1990).

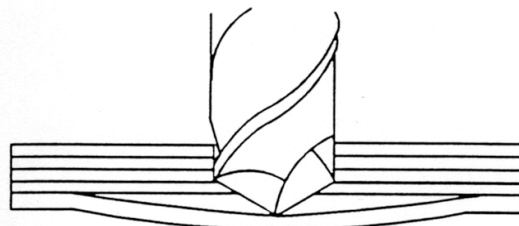


Figura 2 – Mecanismo de delaminação à saída (imagem de (Abrate, 1997)).

Têm sido publicados diversos trabalhos tendo por objectivo a redução deste último tipo de delaminação na furação de compósitos. Por exemplo, Piquet et al. (2000) sugeriu um desenho específico de broca em carboneto de tungsténio com um pequeno ângulo de saída – 6° – com a consequente redução da largura da ponta da broca, aumento do número de arestas cortantes para três a seis e um ângulo de ponta de 118° . Refere ainda a necessidade de adoptar uma estratégia de avanço variável, recorrendo a máquinas de CNC (Controlo Numérico Computorizado), com o objectivo de manter controlada a força axial envolvida. Um outro estudo, apresentado em (Park et al., 1995), propõe o uso de um movimento de avanço helicoidal com o objectivo de evitar a delaminação e as rebarbas. Um sistema mais interessante, e já patenteado, consiste na furação orbital proposta em (Persson et al., 1997) em que o método de geração do furo combina a rotação da broca em redor do seu próprio eixo com um movimento excêntrico em volta de um eixo principal ao mesmo tempo que a ferramenta avança. As vantagens deste método são a redução da força axial por via da eliminação do centro estacionário da broca, a redução do risco de encravamento da ferramenta por acumulação de aparas e possibilidade de maquinar vários diâmetros de furo com a mesma ferramenta. A delaminação pode também ser evitada recorrendo a sistemas designados como ‘inteligentes’ em que o avanço é regulado em função da fase da furação, sendo mais lento nos momentos em que a broca entra em contacto com a

placa e quando a broca fura as camadas inferiores do laminado (Dharan & Won, 2000). Com o mesmo objectivo, foi sugerida em (Stone & Krishnamurthy, 1996) a implementação de um sistema de controlo baseado numa rede neural para o controlo da força axial durante a furação. Tsao e Hocheng (2004) compararam três geometrias diferentes de ferramenta com diferentes parâmetros de corte, concluindo pela maior importância do avanço e do diâmetro da ferramenta na delaminação. A importância do avanço foi também estudada por Davim e Reis (2003). Um resumo dos principais passos na procura da obtenção de furos em peças de materiais compósitos sem a ocorrência de processos de delaminação pode ser encontrado em Hocheng e Tsao (2005).

A delaminação, por ser um defeito que ocorre não só nas últimas camadas da peça mas também nas camadas interiores, é de difícil detecção por simples inspecção visual. Assim torna-se necessário recorrer a métodos de ensaio não destrutivo para a avaliação adequada deste tipo de dano.

Para a realização dos ensaios experimentais descritos neste trabalho foi utilizada uma placa de resina de epóxico reforçada com fibra de carbono, obtida a partir de pré-impregnado e com propriedades quasi-isotrópicas. Nos ensaios de furação efectuados foram utilizadas três geometrias de broca em carboneto de tungsténio com um diâmetro de 6 mm. Para uma dessas geometrias os furos foram efectuados em duas etapas: pré-furação seguida de furação final. A extensão da zona delaminada foi avaliada através de exames de radiografia das peças e aplicação de algoritmos de Processamento e Análise de Imagem nas imagens adquiridas.

Os resultados experimentais obtidos dividem-se em forças quantificadas durante a operação de furação e avaliação do dano com o auxílio de técnicas de inspecção adequadas. A partir dos valores obtidos são calculados os resultados de critérios de avaliação da qualidade do furo efectuado.

Conclusões relativas à influência das diferentes geometrias de broca na força axial durante a furação e na delaminação (dano de maior gravidade) provocada pelas várias estratégias de furação consideradas são enumeradas na secção final deste artigo.

2. Critérios de avaliação do dano

Após a realização da furação nas placas, torna-se necessário definir critérios que permitam estabelecer comparações entre as diferentes estratégias de maquinagem. Em virtude das propriedades específicas dos compósitos, tais critérios só são aplicáveis na comparação de placas com propriedades idênticas, isto é, com o mesmo tipo de reforço, idêntica sequência de empilhamento e orientação de fibras. Um desses critérios é o *Factor de Delaminação* proposto em (Chen, 1997), F_d , definido como um quociente entre o máximo diâmetro delaminado, D_{max} , e o diâmetro nominal do furo efectuado, D :

$$F_d = D_{max} / D \quad (1).$$

Um outro critério é o *Rácio de Dano* proposto em (Mehta et al., 1992), D_{RAT} , definido como a razão entre a área delaminada à volta do furo, D_{MAR} , e a sua área nominal, A_{AVG} :

$$D_{RAT} = D_{MAR} / A_{AVG} \quad (2).$$

A aplicação de qualquer um dos critérios de avaliação do dano baseia-se na existência de imagens da região danificada obtidas por radiografia, C-Scan ou TAC (Tomografia Axial Computorizada).

A análise do dano pode-se basear em sistemas automáticos de contagem de pixéis em imagens ou por inspecção visual das mesmas através de medição directa das áreas visíveis.

3. Trabalho experimental

Para a execução do trabalho experimental envolvido neste trabalho, foi fabricada uma placa a partir de carbono/epóxico pré-impregnado, com uma sequência de empilhamento $[(0/-45/90/45)]_{4s}$, resultando uma placa com propriedades quasi-isotrópicas. O laminado foi posteriormente sujeito a um ciclo de cura numa prensa de pratos quentes a uma pressão de 300 kPa e uma temperatura de 140 °C durante uma hora, seguido de arrefecimento ao ar. A espessura final das placas é de 4 mm.

Nos ensaios de furação, realizados num centro de maquinagem OKUMA MC-40VA, foram utilizadas três geometrias de broca em carboneto de tungsténio com um diâmetro de 6 mm. As geometrias comparadas foram a broca helicoidal, a broca tipo Brad e uma broca bi-diametral desenvolvida especificamente para a maquinagem deste tipo de laminados – figura 3.

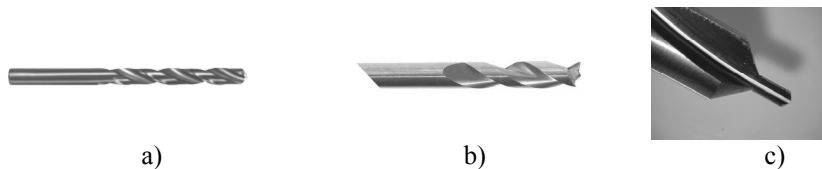


Figura 3 – Brocas: a) helicoidal; b) tipo Brad; c) bi-diametral.

Nos furos realizados com a broca helicoidal foram ainda comparadas duas situações: sem recurso a pré-furação e com o recurso a um pré-furo de 1.1 mm de diâmetro, correspondente a 18% do diâmetro final. As características das brocas bem como os parâmetros de corte utilizados são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Brocas utilizadas e parâmetros de corte considerados.

Ferramenta	Ângulo de ponta	Vel. Corte [m/min]	Avanço [mm/rot]
Broca helicoidal	118°	80	0.05
Broca helicoidal com pré-furo de 1.1 mm	118°	80	0.05
Broca ‘Brad’	-----	80	0.05
Broca ‘bi-diametral’	-----	80	0.05

Durante a furação, a força axial, F_x , foi monitorizada através de um dinamómetro Kistler 4782 associado a um computador para aquisição dos dados. Todas as peças

foram furadas sem recurso a placa sacrificial, normalmente colocada por baixo da placa a furar, diminuindo a possibilidade de delaminação.

A broca helicoidal tem uma geometria padrão, comum em qualquer fabricante deste tipo de ferramentas, com um ângulo de ponta de 118° . Com o objectivo de poder quantificar a redução do dano provocado na operação de furação, associou-se a esta broca um pré-furo de 1.1 mm de diâmetro. A broca tipo Brad é uma broca com uma geometria de ponta específica, em forma de foice, inicialmente desenvolvida para o corte de madeira, e que provoca o tensionamento das fibras antes do seu corte, proporcionando um corte “limpo” destas. Em consequência a superfície maquinada fica com menor rugosidade. Finalmente, foi experimentada uma broca de desenho bi-diametral. A ideia para o desenvolvimento deste tipo de broca surgiu na sequência de uma conferência do Prof. H. Dharan no INEGI (Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial), em 2000 [Dharan, 2000]. Esta broca tem dois diâmetros de furação, respectivamente 1.25 e 6 mm, dividindo assim a operação de furação em duas fases. Tal geometria proporciona uma redução da força axial máxima atingida durante a furação. Outra vantagem desta broca é a redução do efeito de indentação causado pela ponta da broca numa furação efectuada num só passo.

4. Utilização de técnicas não-destrutivas

Na fase seguinte, a extensão da zona delaminada foi avaliada através de exames de radiografia das peças. A radiografia é um processo largamente utilizado em ensaios não-destrutivos. No caso dos materiais compósitos, torna-se necessário o uso de um líquido contrastante, no qual as peças são previamente mergulhadas em câmara escura. No caso deste trabalho foi usado o di-iodometano com um tempo de imersão de 90 minutos. As películas assim obtidas foram posteriormente digitalizadas para permitir a medição das regiões delaminadas recorrendo a algoritmos de Processamento e Análise de Imagem.

As imagens obtidas são em 255 níveis de cinzento, correspondendo as zonas mais escuras a áreas com dano e as mais claras a regiões sem dano – figura 4.

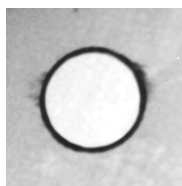


Figura 4 – Exemplo de uma imagem obtida por radiografia de uma placa.

De forma a obter as medidas necessárias para as equações (1) e (2), a partir das imagens digitalizadas, nomeadamente os valores da área delaminada, da área do furo, do máximo diâmetro delaminado e do diâmetro do furo, utilizou-se uma plataforma de processamento e análise de imagem previamente desenvolvida para ambientes *Microsoft Windows* (Tavares, 2000; Tavares et al, 2002). Com esta plataforma torna-se possível aplicar às imagens obtidas experimentalmente, algoritmos usuais de

processamento e análise de imagem, como de filtragem, binarização e segmentação e análise de regiões, (Awcock & Thomas, 1995; Jain, 1995; Schalkoff, 1989).

Nas imagens obtidas por radiografia e posterior digitalização, começou-se por seleccionar em cada uma a respectiva zona de interesse. Esta fase de processamento foi realizada manualmente, apenas com o propósito de diminuir o esforço computacional necessário nas etapas subsequentes. Seguidamente, aplicou-se em cada imagem resultante da operação de selecção um filtro de suavização de forma a diminuir o ruído presente resultante do processo de aquisição. O filtro usado foi um filtro de média com uma máscara de 3x3 pixéis. Para segmentar as áreas com interesse em cada imagem suavizada (a área do furo e a área do dano), foi utilizada uma técnica de binarização automática baseada em limiares adaptativos (Tavares, 2000; Tavares et al, 2002). Como esta última operação originou pequenas áreas de ruído e/ou áreas subdivididas, foram posteriormente aplicados filtros morfológicos de erosão e de dilatação de forma a obter regiões com topologia mais adequada. Assim após esta filtragem obtiveram-se imagens apenas constituídas por três regiões: fundo da imagem, área do furo e zona delaminada. A última operação consistiu na análise de cada uma das imagens resultantes do procedimento de processamento de imagem pela aplicação de um algoritmo de análise de regiões (Tavares, 2000; Tavares et al, 2002). Com esse algoritmo foi possível destacar (segmentar) cada uma das áreas presentes e, para cada uma dessas áreas, o cálculo das medidas necessárias (áreas e comprimentos). Na figura 5 é apresentado um exemplo de determinação das medidas associadas numa imagem de radiografia, envolvendo as fases enumeradas.

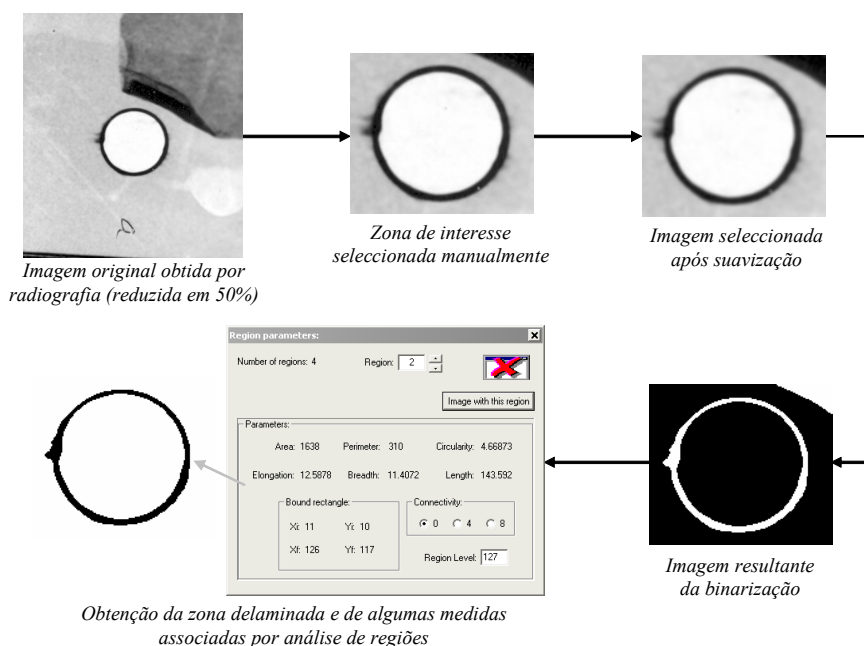


Figura 5 – Exemplo de processamento e análise de uma imagem obtida por radiografia de forma a obter as medidas associadas à zona delaminada.

5. Resultados e discussão

Os resultados obtidos dividem-se em forças medidas durante a operação de furação e avaliação do dano com o auxílio das técnicas de inspecção não destrutiva anteriormente referidas. A partir desses valores são calculados os resultados dos critérios de avaliação da qualidade do furo, de acordo com as equações (1) e (2).

Nas condições experimentais descritas os resultados obtidos mostram claramente a influência da geometria da ferramenta, permitindo estabelecer uma ordenação entre as diversas ferramentas utilizadas. Fica igualmente evidenciado o efeito da utilização do pré-furo (ou furo-piloto) na furação com compósitos. O valor mais baixo da força axial máxima, F_{xmax} , valor usado na comparação, foi obtido nos furos executados com a broca ‘Brad’ – figura 6. A broca bi-diametral apresenta um valor de força máxima quase idêntico e a broca helicoidal tem o valor mais elevado de todos. O recurso à pré-furação com um diâmetro de 1.1 mm permitiu uma maior aproximação dos valores de força máxima obtidos com as outras ferramentas usadas. Assim, pode-se dizer que uma escolha adequada da geometria de ferramenta, conjugada com uma optimização de parâmetros, que não foi objecto deste trabalho, permite minimizar as forças axiais durante a furação. Este aspecto torna-se particularmente importante à medida que a ponta da broca se aproxima das camadas finais do laminado, pois a possibilidade de ocorrência e propagação da delaminação fica reduzida.

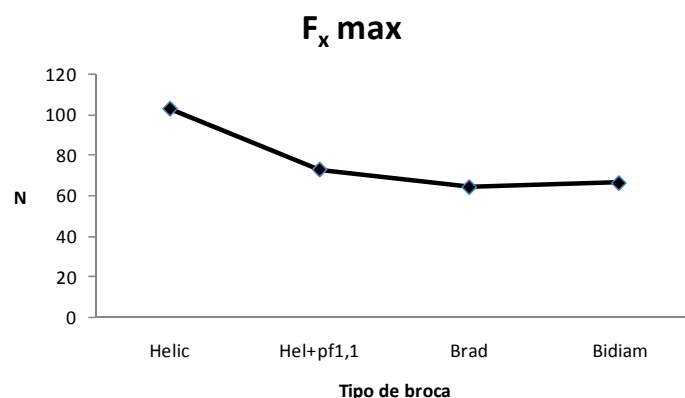


Figura 6 – Influência da geometria da ferramenta na força máxima, F_{xmax} [N], durante a operação de furação.

Outro aspecto relevante a referir é a importância da pré-furação na diminuição da força axial necessária para a operação de abertura do furo por maquinagem. Em primeiro lugar, é nítido que o recurso à pré-furação permite uma redução significativa da força axial. Tal redução depende do diâmetro de pré-furação seleccionado, sendo no caso presente da ordem dos 30%. Este efeito pode ser explicado pelo facto de, na furação final, a quantidade de material que resiste ao avanço da broca ter sido reduzida na pré-furação. A redução do esforço de corte é um factor conhecido, do qual esta estratégia aproveita as vantagens. A acção de indentação exercida pela ponta da broca de diâmetro final é assim reduzida ou mesmo anulada, evitando um dos

factores que geralmente é apontado como responsável pelo início da delaminação. De referir que em idêntico procedimento adoptado para a broca ‘Brad’ não foi notado este efeito, o que poderá estar relacionado com a não existência de uma ponta de broca quasi-estacionária nesta geometria de ferramenta.

A avaliação do dano revelou algumas diferenças relativas à ordenação das diferentes geometrias de ferramenta. Como se pode verificar nas figuras 7a) e 7b), o critério do Factor de Delaminação é menos favorável para a broca ‘Brad’ do que o critério do Rácio de Dano. Tal pode estar relacionado com a forma como o dano se distribui à volta do furo. Sempre que numa das direcções a delaminação é mais extensa, o critério do Factor de Delaminação é mais severo. Em qualquer dos critérios o benefício da pré-furação é nítido, para o caso dos furos executados com brocas helicoidais.

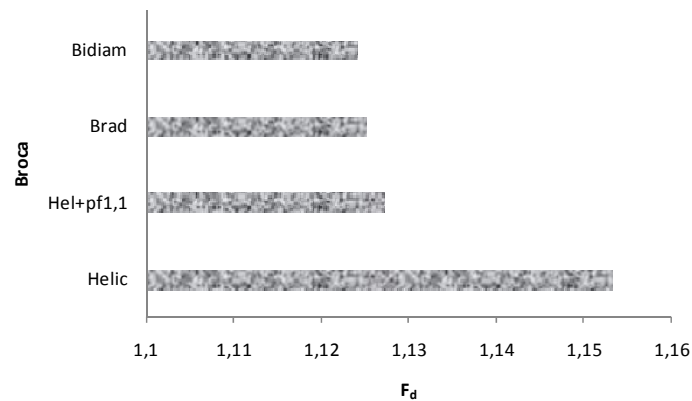


Figura 7a – Influência da geometria da ferramenta no Factor de Delaminação, F_d .

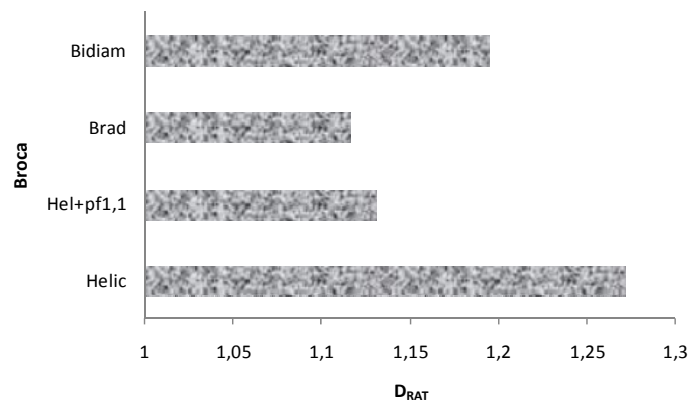


Figura 7b – Influência da geometria da ferramenta no Rácio de Dano, D_{RAT} .

Observando os resultados relativos à broca bi-diametral verifica-se a ocorrência de uma situação semelhante à verificada com a broca ‘Brad’, isto é, há discrepância nos resultados obtidos. Isto indica que os critérios não serão equivalentes. De notar que,

na utilização da broca bi-diametral eram esperados resultados de delaminação próximos dos obtidos com as brocas helicoidais associadas a uma pré-furação de 1.1 mm de diâmetro.

Um dos factores que pode contribuir para a falta de resultados mais homogêneos pode estar ligado à falta de optimização de parâmetros não realizada neste trabalho, baseado numa situação de parâmetros de corte idênticos para todas as brocas. De facto, houve um trabalho prévio de optimização, não descrito neste trabalho, mas baseado apenas nas brocas helicoidais. Contudo, será perfeitamente natural que a cada geometria de broca corresponda um conjunto de parâmetros específico.

6. Conclusões

Neste trabalho foram apresentados resultados experimentais relativos a ensaios de furação num conjunto de placas carbono/epóxico, utilizando três geometrias de broca, uma das quais com recurso à pré-furação. Foram recolhidos dados relativos à força axial durante a operação de furação e, posteriormente, as peças foram radiografadas, com o auxílio de um líquido contrastante. As imagens obtidas foram processadas e analisadas com recurso a algoritmos de Processamento e Análise de Imagem, permitindo assim identificar as regiões envolvidas na delaminação bem como medir as suas áreas e diâmetros. Do trabalho realizado e apresentado neste artigo podem ser retiradas algumas conclusões principais.

A geometria da broca influencia, para as condições experimentais consideradas, os valores de força axial máxima durante a furação e os valores relativos à região delaminada à volta do furo. Nas condições de furação numa só etapa, isto é sem pré-furação, os furos realizados com a broca helicoidal apresentaram maior dano.

O recurso à pré-furação permite uma redução apreciável dos valores de força axial durante a furação e, consequentemente, dos valores relativos à extensão do dano. O valor utilizado para o diâmetro de pré-furação, permitindo uma redução apreciável da delaminação à volta do furo, foi de 1.1 mm, que corresponde a cerca de 18% do diâmetro nominal do furo executado.

Considerando apenas os resultados da delaminação, e com excepção da broca helicoidal sem pré-furação, qualquer uma das restantes três técnicas de furação utilizadas apresentou resultados semelhantes. Uma melhor avaliação da estratégia de maquinagem mais adequada terá de ser baseada numa optimização prévia dos parâmetros de corte para cada uma das geometrias comparadas. De notar que a broca bi-diametral ainda se encontra numa fase inicial do seu desenvolvimento, sendo de esperar melhores resultados após uma optimização dos parâmetros de corte e da sua própria geometria.

O uso de exames de radiografia em peças opacas, como é o caso das empregues neste trabalho, permitiu a correcta identificação e avaliação da região afectada à volta do furo. Os algoritmos computacionais de Processamento e Análise de Imagem referidos e utilizados, foram essenciais na determinação das medidas necessárias à aplicação dos dois critérios de dano considerados a partir das imagens de radiografia. Entendemos que o uso destes algoritmos pode ser facilmente estendido com sucesso a outros domínios de aplicação na área da inspecção não destrutiva de materiais e peças.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente desenvolvido no âmbito dos projectos de investigação com referências PTDC/EME-TME/66207/2006 e POSC/EEA-SRI/55386/2004 financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

Bibliografia

- Langella, A., Nele, L., Maio, A. (2005). A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials. *Composites A*, 36, 83-93.
- Stone, R., Krishnamurthy, K. (1996). A Neural Network Thrust Force Controller to Minimize Delamination During Drilling of Graphite-Epoxy Composites. *Int. J. Machine Tools and Manufacture*, 36, 985-1003.
- Persson, E., Eriksson, I., Zackrisson, L. (1997). Effects of hole machining defects on strength and fatigue life of composite laminates. *Composites A*, 28, 141-151.
- Abrate, S. (1997). Machining of Composite Materials. *Composites Engineering Handbook*, Ed. P. K. Mallick, Marcel Dekker, New York, 777-809.
- Hocheng, H., Dharan, C. K. H. (1990). Delamination during drilling in composite laminates. *J. of Engineering for Industry*, 112, 236-239, 1990.
- Piquet, R., Ferret, B., Lachaud, F., Swider, P. (2000). Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills. *Composites A*, 31, 1107-1115.
- Park, K. Y., Choi, J. H., Lee, D. G. (1995). Delamination-free and high efficiency drilling of carbon fiber reinforced plastics. *J. of Composite Materials*, 29, 1988-2002.
- Dharan, C. H. K., Won, M. S. (2000). Machining parameters for an intelligent machining system for composite laminates. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 39, 415-426.
- Tsao, C. C., Hocheng, H. (2004). Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 44, 1085-1090.
- Davim, J. P., Reis, P. (2003). Furação de laminados epóxis reforçados a fibras de carbono (CFRP): relação entre as forças de corte e o factor de delaminação. *VI Congr. Ibero-Americano de Engenharia Mecânica*, Coimbra, 1079-1084.
- Hocheng, H., Tsao, C. C. (2005). The path towards delamination-free drilling of composite materials. *J. of Materials Processing Technology*, 167, 251-264.
- Chen, W. C. (1997). Some experimental investigations in the drilling of carbon fibre-reinforced plastic (CFRP) composite laminates. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 37, 1097-1108.
- Mehta, M., Reinhart, T. J., Soni, A. H. (1992). Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/Gr composite laminates. *Proc. of the Machining Composite Materials Symposium, ASM Materials Week*, 113-126.
- Dharan, C. K. H. (2000). *Conference on composites machining*, INEGI, Porto.
- Tavares, J. M. R. S. (2000), Tese de Doutoramento: *Análise de Movimento de Corpos Deformáveis usando Visão Computacional*, FEUP, Porto.
- Tavares, J. M. R. S., Barbosa, J. G., Padilha, A. J. (2002). Apresentação de um Banco de Desenvolvimento e Ensaio para Objectos Deformáveis. *RESI – Revista Electrónica de Sistemas de Informação*, vol. 1.
- Awcock, G. W., Thomas, R. (1995). *Applied image processing*, McGRAW-HILL International Editions, New York.
- Jain, R., Kasturi, R., Schunck, B. G. (1995), *Machine Vision*, McGRAW-HILL International Editions, New York.
- Schalkoff, R. J. (1989). *Digital image processing and computer vision*, John Wiley & Sons, Inc.